УДК 629.423.316

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЯКОРЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

С.Г. Шантаренко

Омский государственный университет путей сообщения
E-mail: nis@omskcity.com

Представлен подробный анализ изменения потенциальной энергии якоря тягового электродвигателя в зависимости от отклонений технологических параметров от нормативных значений. Приводятся выражения для потенциальной энергии якоря, которые позволяют оптимизировать технологию ремонта двигателя.

Надежность любой сложной электромеханической системы во многом определяется надежной работой электропривода, которая в значительной степени зависит от безотказности тягового электродвигателя (ТЭД). Для магистральных электровозов одной из основных причин заходов на внеплановые ремонты являются повреждения тягового привода и колесных пар с буксами, при этом выходы из строя тяговых двигателей составляют 20...25 % от общего количества отказов. Таким об-

разом, исследование качества функционирования, разработка методов и средств объективной оценки технического состояния и совершенствование системы технического обслуживания и ремонта тяговых электродвигателей являются актуальными.

Рассмотрим, как влияют изменения ряда технологических параметров тягового электродвигателя на потенциальную энергию его якоря.

Потенциальная энергия термодинамической системы является энергией ее состояния. Математическое выражение энергии зависит от выбора системы отсчета и от принятых обобщенных координат. В качестве системы отсчета выбираем декартовую прямоугольную систему $0XYZ$, одна из осей которой ($0Y$) совмещена с продольной осью симметрии тягового электродвигателя. Оси $0Z$ и $0X$ располагаем в плоскости, перпендикулярной к оси $0Y$ и проходящей через центр тяжести якоря ТЭД. Для составления выражения потенциальной энергии якоря $П_я$ необходимо выбрать кинематическую схему системы тягового электродвигателя.

Потенциальная энергия определяется перемещениями упругих элементов в узлах сочленения якоря ТЭД с другими деталями колесно-моторного блока (КМБ) и силами электромагнитного взаимодействия остова двигателя с якорем. Якорь ТЭД связан с КМБ через опорные подшипники и шестерни редуктора. Эти связи имеют чисто механический характер и выражаются через геометрические координаты и физико-механические параметры материала взаимодействующих тел. Силы электромагнитного взаимодействия определяются токами в цепи якоря для заданного режима работы ТЭД и геометрией относительного расположения якоря и остова. Поэтому в качестве обобщенных координат целесообразно выбрать:

- x_a, y_a, z_a – смещения центра оси якоря вдоль соответствующих координатных осей; Θ_a, φ_a, ψ_a – повороты оси якоря вокруг осей $0X$, $0Y$, $0Z$ соответственно;
- $i_в$ – ток в цепи возбуждения тягового двигателя.

Потенциальную энергию якоря можно представить следующим образом:

$$П_я = П_{мп} + П_{уп},$$

где $П_{мп}$ – составляющая, обусловленная силами магнитного поля; $П_{уп}$ – составляющая, определяемая упругими связями якоря механического характера.

Технологическими параметрами являются:

- $\varepsilon_п$ – зазоры в опорных подшипниках;
- $\varepsilon_р$ – зазоры в системе зацепления шестерен редуктора;
- $\varepsilon_о$ – эксцентриситет якоря, обусловленный несовершенством технологии ремонта и сборки.

Смещение воздушного зазора под главными полюсами относительно номинала будет также определяться и динамическим эксцентриситетом $\varepsilon_д$, который не поддается непосредственному замеру, так как он является величиной переменной как по времени, так и по длине якоря.

В отечественной литературе по расчету и проектированию электрических машин рекомендуется формула расчета силы одностороннего магнитного притяжения [1]:

$$F_m = \pi \left(\frac{B}{k}\right)^2 \alpha_\delta \frac{D_a \ell_a}{\delta_г} \varepsilon, \qquad (1)$$

где B – величина магнитной индукции в воздушном зазоре под главным полюсом; α_δ – полюсное перекрытие; D_a, ℓ_a – диаметр и длина якоря; k – постоянная для данного типа двигателя; ε – суммарный эксцентриситет.

Формула (1) применима в случае параллельного смещения якоря относительно оси двигателя в установившемся режиме работы ТЭД. Следует отметить, что магнитное поле не является однородным в пределах даже одного главного полюса, так как геометрия расположения якоря и статора переменная как по длине якоря, так и во времени. Однако эту формулу можно взять за основу расчета силы тяжения, если принять, что она справедлива для участка шириной $d\ell$, перпендикулярного оси двигателя

$$dF = \pi \left(\frac{B}{k}\right)^2 \alpha_\delta \frac{D_a}{\delta_г} \varepsilon_c \, d\ell_a. \qquad (2)$$

В формуле (2) величина ε_c означает суммарный эксцентриситет в выбранном сечении $\varepsilon_c=\varepsilon_о+\varepsilon_д$, величина магнитной индукции может быть принята как среднее значение радиальной составляющей вектора $\overline{B}$ в нормальном смещении эксцентриситета от оси ТЭД в выбранном сечении двигателя.

Для расчета эксцентриситета ε_c центра тяжести C сечения якоря, отстоящего от начала отсчета на расстоянии y_c, применим расчетную схему на рис. 1.

Найдем выражение радиальной составляющей вектора $\overline{B}$ магнитного поля, создаваемого одним полюсом статора в произвольной точек сечения C.

Так как полюс представляет собой ферромагнитный сердечник внутри катушки с током $I_в$, то магнитное поле будет формироваться в основном за счет намагниченного сердечника

$$\overline{B} = \overline{B}_о + \overline{B}_м,$$

где $\overline{B}_о$ – поле, создаваемое катушкой; $\overline{B}_м=f(\overline{B}_о)$ – поле, создаваемое магнитом.

Для ферромагнетиков $\overline{B}_м >> \overline{B}_о$. Функция $f(\overline{B}_о)$ зависит от физико-химических свойств материала сердечника и от его конструкции. Для каждого типа двигателя эту функцию можно считать заданной.

Для расчета вектора $\overline{B}_о$ в произвольной точке $M(x,y_c,z)$ сечения C применим расчетную схему на рис. 2.

Для удобства расчета выбираем систему отсчета $\tilde{0}\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$, смещенную относительно исходных координат $0xyz$ вдоль линии эксцентриситета в точку $\tilde{0}(R_0\cos\varphi, 0, R_0\sin\varphi)$ и развернутую вокруг оси $\tilde{0}\tilde{y}$ на угол $\alpha=\pi/2-\varphi$ против часовой стрелки.

Эксцентриситет ε_c определяется через обобщенные координаты и $\varepsilon_о$ по формуле

$$\varepsilon_c = [(\varepsilon_o \cos\varphi + z_a + (\text{sign } y_c)\sin\Theta_a\ y_c)^2 +$$

$$+(\varepsilon_o \sin\varphi + x_o - (\text{sign } y_c)\sin\psi_a\ y_c)^2]^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь φ – угол вращения якоря вокруг своей оси. Начальные значения углов Θ_a и φ_a определяются положением опорных подшипников относительно осей симметрии двигателя.

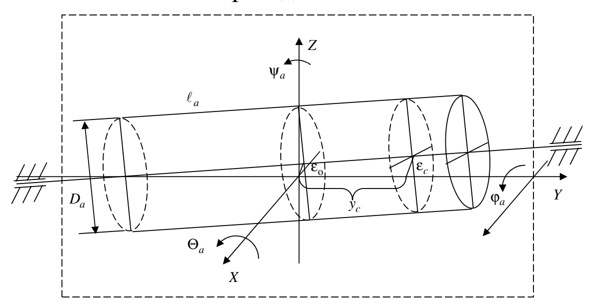


Рис. 1. *Расчетная схема определения эксцентриситета якоря*

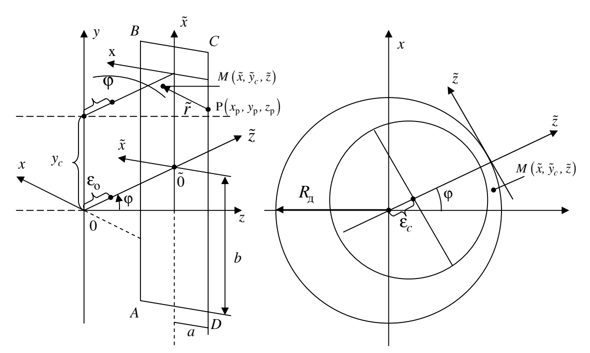


Рис. 2. *Расчетная схема вектора магнитного поля*

Так как ψ_a и Θ_a углы малые, то можно принять $\sin\psi_a \cong \psi_a$; $\sin\Theta_a \cong \Theta_a$; $\cos\psi_a \cong \cos\Theta_a \cong 1$. Тогда для эксцентриситета ε_c получаем выражение:

$$\varepsilon_c = [z_a^2 + x_a^2 + \varepsilon_o^2 + 2\varepsilon_o(z_a \cos\varphi + x_a \sin\varphi) +$$

$$+2y_c \text{ sign } y_c(\Theta_a(z_a + \varepsilon_o \cos\varphi) - \psi_a(x_a + \varepsilon_o \sin\varphi))]^{\frac{1}{2}}.$$

По закону Био-Савара элемент проводника $d\ell$ с током $I_в$ создает в точке M пространства магнитное поле с индукцией

$$d\overline{B}_0 = \frac{\mu_0 I_в}{4\pi r^2}[d\overline{\ell}, \overline{r}_0] = \frac{\mu_0 I_в}{4\pi r^3}[d\overline{\ell}, \overline{r}].$$

Пусть элемент $d\ell$ располагается в точке $P(x_p, y_p, z_p)$ контура. Тогда

$$d\overline{l} = \{dx_p, dy_p, dz_p\};$$

$$\overline{r} = \{\tilde{x} - x_p; \tilde{y}_c - y_p; \tilde{z} - z_p\}.$$

Точку M выбираем в плоскости сечения C. Так как контур расположен в плоскости $\tilde{x}0\tilde{y}$, то

$$z_p = 0 \quad и \quad dz_p = 0;$$

$$d\overline{\ell} \times \overline{r} = \overline{i}\ \tilde{z}\ dy_p - \overline{j}\ \tilde{z}\ dx_p +$$

$$+\overline{k}[(\tilde{y}_c - y_p)\, dx_p - (\tilde{x} - x_p)\, dy_p];$$

$$r^3 = \sqrt{(\tilde{z}^2 + (\tilde{x} - x_p)^2 + (\tilde{y}_c - y_p)^2)^3}.$$

Полная индукция магнитного поля в точке M найдется через интеграл

$$\overline{B}_0 = \int_L d\overline{B}_0 :=$$

$$= \frac{\mu_0 I_в}{4\pi}\int_L \frac{\overline{i}\ \tilde{z}\ dy_p - \overline{j}\ \tilde{z}\ dx_p + \overline{k}\begin{bmatrix}(\tilde{y}_c - y_p)\, dx_p - \\ -(\tilde{x} - x_p)\, dy_p\end{bmatrix}}{r^3}. \quad (3)$$

Контур L представим прямоугольным четырехугольником $ABCD$. Вдоль контура выполняются условия:

- на линии AB имеем $x_p = -a$, $y_p \in [-b; b]$, $dx_p = 0$;
- на линии BC: $y_p = b$, $x_p \in [-a; a]$, $dy_p = 0$;
- на линии CD: $x_p = a$, $y_p \in [b; -b]$, $dx_p = 0$;
- на линии DA: $y_p = -b$, $x_p \in [a; -a]$, $dy_p = 0$;

Векторное поле $\overline{B}$ в точке M будет равно сумме векторов $\sum_{i=1}^{4}\overline{B}_0^{(i)}$, создаваемых в точке M проводниками AB, BC, CD и DA с током $I_в$. Рассчитаем векторы $\overline{B}_0^{(i)}$.

Проводник AB: $x_p = -a$, $y_p \in [b; -b]$, $dx_p = 0$,

$$\overline{B}_0^{(1)} = \frac{\mu_0 I_в}{4\pi}\left[\frac{b - \tilde{y}_c}{\sqrt{\tilde{z}^2 + (\tilde{x} + a)^2 + (b - \tilde{y}_c)^2}} + \frac{b + \tilde{y}_c}{\sqrt{\tilde{z}^2 + (\tilde{x} + a)^2 + (b + \tilde{y}_c)^2}}\right] \times$$

$$\times \frac{1}{[\tilde{z}^2 + (\tilde{x} + a)^2]}\{\overline{i}\ \tilde{z} - \overline{k}(\tilde{x} + a)\}.$$

Проводник BC: $y_p = b$, $x_p \in [-a; a]$, $dy_p = 0$,

$$\overline{B}_0^{(2)} = \frac{\mu_0 I_в}{4\pi}\left[\frac{a - \tilde{x}}{\sqrt{\tilde{z}^2 + (a - \tilde{x})^2 + (\tilde{y}_c - b)^2}} - \frac{a + \tilde{x}}{\sqrt{\tilde{z}^2 + (a + \tilde{x})^2 + (\tilde{y}_c - b)^2}}\right] \times$$

$$\times \frac{1}{[\tilde{z}^2 + (\tilde{y}_c - b)^2]}\{-\overline{j}\ \tilde{z} + \overline{k}(\tilde{y}_c - b)\}.$$

Проводник CD: $x_p = a$, $y_p \in [b; -b]$, $dx_p = 0$,

$$\overline{B}_0^{(3)} = -\frac{\mu_0 I_в}{4\pi}\left[\frac{b - \tilde{y}_c}{\sqrt{\tilde{z}^2 + (\tilde{x} - a)^2 + (b - \tilde{y}_c)^2}} - \frac{b + \tilde{y}_c}{\sqrt{\tilde{z}^2 + (\tilde{x} - a)^2 + (b + \tilde{y}_c)^2}}\right] \times$$

$$\times \frac{1}{[\tilde{z}^2 + (\tilde{x} - a)^2]}\{\overline{i}\ \tilde{z} - \overline{k}(\tilde{x} - a)\}.$$

Проводник DA: $y_p = -b$, $x_p \in [a; -a]$, $dy_p = 0$,

$$\overline{B}_0^{(4)} = \frac{\mu_0 I_в}{4\pi}\left[\frac{a - \tilde{x}}{\sqrt{\tilde{z}^2 + (a - \tilde{x})^2 + (\tilde{y}_c + b)^2}} - \frac{a + \tilde{x}}{\sqrt{\tilde{z}^2 + (a + \tilde{x})^2 + (\tilde{y}_c + b)^2}}\right] \times$$

$$\times \frac{1}{[\tilde{z}^2 + (\tilde{y}_c + b)^2]}\{-\overline{j}\ \tilde{z} + \overline{k}(\tilde{y}_c + b)\}.$$

Для радиальной компоненты $\overline{B}_0^{(r)}$ суммарного магнитного поля получим выражение

$$\overline{B}_0^{(r)} = \frac{\mu_0 I_в}{4\pi}\begin{bmatrix} -J_{AB}(\tilde{x}+a)+J_{BC}(\tilde{y}_c-b)- \\ -J_{CD}(\tilde{x}-a)+J_{DA}(\tilde{y}_c+b) \end{bmatrix},$$

где

$$J_{AB} = \frac{1}{\tilde{z}^2+(\tilde{x}+a)^2}\begin{bmatrix} \dfrac{b-\tilde{y}_c}{\sqrt{\tilde{z}^2+(\tilde{x}+a)^2+(b-\tilde{y}_c)^2}}+ \\ +\dfrac{b+\tilde{y}_c}{\sqrt{\tilde{z}^2+(\tilde{x}+a)^2+(b+\tilde{y}_c)^2}} \end{bmatrix};$$

$$J_{BC} = \frac{1}{\tilde{z}^2+(\tilde{y}_c-b)^2}\begin{bmatrix} \dfrac{a-\tilde{x}}{\sqrt{\tilde{z}^2+(a+\tilde{x})^2+(\tilde{y}_c-b)^2}}- \\ -\dfrac{a+\tilde{x}}{\sqrt{\tilde{z}^2+(a+\tilde{x})^2+(b-\tilde{y}_c)^2}} \end{bmatrix};$$

$$J_{CD} = -\frac{1}{\tilde{z}^2+(\tilde{x}+a)^2}\begin{bmatrix} \dfrac{b-\tilde{y}_c}{\sqrt{\tilde{z}^2+(\tilde{x}-a)^2+(b-\tilde{y}_c)^2}}+ \\ \dfrac{b+\tilde{y}_c}{\sqrt{\tilde{z}^2+(\tilde{x}-a)^2+(b+\tilde{y}_c)^2}} \end{bmatrix};$$

$$J_{DA} = -\frac{1}{\tilde{z}^2+(\tilde{y}_c-b)^2}\begin{bmatrix} \dfrac{a-\tilde{x}}{\sqrt{\tilde{z}^2+(a-\tilde{x})^2+(\tilde{y}_c+b)^2}}- \\ -\dfrac{a+\tilde{x}}{\sqrt{\tilde{z}^2+(a+\tilde{x})^2+(\tilde{y}_c+b)^2}} \end{bmatrix}.$$

В качестве усредненного значения напряженности можно взять $\overline{B}_0^{(r)}(y_c)$, приняв в формуле (3) $x=0$ и $z=0{,}5(R_\partial-(\varepsilon_c+R_a))$.

Так как $z<<a$ и $z<<b$, то для упрощения аналитических исследований принимаем $z=0$.

Тогда получим:

$$J_{AB} = \frac{1}{a^2}\left[\frac{b-\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b-\tilde{y}_c)^2}}+\frac{b+\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b+\tilde{y}_c)^2}}\right];$$

$$J_{BC} = J_{DA} = 0;$$

$$J_{CD} = -\frac{1}{a^2}\left[\frac{b-\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b-\tilde{y}_c)^2}}+\frac{b+\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b+\tilde{y}_c)^2}}\right];$$

$$\overline{B}_0^{(r)} = \frac{\mu_0 I_в}{4\pi}\left[\frac{b-\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b-\tilde{y}_c)^2}}+\frac{b+\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b+\tilde{y}_c)^2}}\right].$$

При расчетах магнитное поле $\overline{B}_м$ можно с достаточной точностью принять равным

$$\overline{B}_м = k_м \overline{B}_0,$$

где $k_м$ – постоянная для материала сердечника.

Для принятых допущений потенциальная энергия сил притяжения $П_{мп}$ выразится достаточно простой формулой

$$П_{мп} =$$

$$= \int_{-b}^{b}\left(\int_0^{\varepsilon_c}\frac{\alpha_\delta R_a k_м^2 \mu_0 I_в^2}{k^2\delta_г 2\pi\, a^2}\begin{bmatrix} \dfrac{b-\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b-\tilde{y}_c)^2}}+ \\ +\dfrac{b+\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b+\tilde{y}_c)^2}} \end{bmatrix}^2 \varepsilon_c\, d\varepsilon_c\right)d\tilde{y}_c =$$

$$= A_1\left(A_2\int_{-b}^{b}\left[\frac{b-\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b-\tilde{y}_c)^2}}+\frac{b+\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b+\tilde{y}_c)^2}}\right]^2 d\tilde{y}_c+\right.$$

$$\left.+2A_3\int_{-b}^{b}\operatorname{sign}\tilde{y}_c\cdot\tilde{y}_c\begin{bmatrix} \dfrac{b-\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b-\tilde{y}_c)^2}}+ \\ +\dfrac{b+\tilde{y}_c}{\sqrt{a^2+(b+\tilde{y}_c)^2}} \end{bmatrix}d\tilde{y}_c.\right) \quad (4)$$

Здесь

$$A_1 = \frac{\alpha_\delta R_a k_м^2 \mu_0 I_в^2}{4\pi k^2\, a^2\, \delta_г}s;$$

$$A_2 = z_a^2+x_a^2+\varepsilon_a^2+2\varepsilon_0(z_a\cos\varphi+x_a\sin\varphi);$$

$$A_3 = \Theta(z_a+\varepsilon_0\cos\varphi)-\psi_a(x_a+\varepsilon_0\sin\varphi).$$

Для описания сил в опорных подшипниках и в системе редуктора можно воспользоваться характеристиками с «люфтом» [2]

$$F_n^{\mp} = \frac{C_p}{2}\left(1+\frac{\operatorname{sign}(|\delta_n^{\mp}|-\varepsilon_n)}{\delta_n^{\mp}}-\varepsilon_n\operatorname{sign}\delta_n^{\mp}\right)^{\frac{3}{2}};$$

$$F_p = \frac{C_p}{2}\left(1+\frac{\operatorname{sign}(|\delta_p|-\varepsilon_p)}{\delta_p}-\varepsilon_p\operatorname{sign}\delta_p\right)^{\frac{3}{2}}.$$

где $\delta_n^{\mp}$ – упругие деформации в системе сочленения с опорными подшипниками («–» – для левого, «+» – для правого подшипника, рис. 1).

$$\delta_n^{\mp} = [(z_a \mp \ell_\partial\sin\Theta_a)^2+(x_a\mp\ell_p\sin\psi_a)^2]^2,$$

где ℓ_∂ – расстояние между подшипниками;

$$\delta_p = r_{ш1}\,\varphi + r_{ш2}\,\varphi_{кп},$$

$r_{ш1}$, $r_{ш2}$ – радиусы зубчатых шестерен редуктора; $\varphi_{кп}$ – угол вращения колеса колесной пары.

Потенциальная энергия упругих связей якоря имеет вид

$$П_{уп} = \int_0^{\delta_n^-}F_n^- d\delta_n^- + \int_0^{\delta_n^+}F_n^+ d\delta_n^+ + 2\int_0^{\delta_p}F_p\, d\delta_p. \quad (5)$$

Полученные формулы (4, 5) позволяют произвести подробный анализ изменения потенциальной энергии якоря в зависимости от отклонений технологических параметров тягового электродвигателя от номинальных значений.

Выполненные исследования дают возможность совершенствовать технологию ремонта и наладки тяговых электродвигателей при выполнении их текущих и капитального ремонтов в период эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Находкин М.Д., Василенко Г.В., Козорезов Н.А., Лузкин Д.М. Проектирование тяговых электрических машин. – М., 1967. – 536 с.
2. Шантаренко С.Г. Влияние технологических факторов на качество функционирования коллекторных тяговых электродвигателей магистрального электроподвижного состава: Дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. – Защищ. 27.06.2000; Утв. 13.10.2000; 04200010451. – М., 2000. – 214 с.

УДК 532.529